ガラス層内の熱伝達

功刀雅長・田中俊次・清水 聡・北村喜久雄

(京都大学工学部)

Heat Transmission through Molten Glasses

By M. KUNUGI, S. TANAKA, S. SHIMIZU and K. KITAMURA

(Dept. of Ind. Chem., Faculty of Engineering, Kyoto University)

On the three commercial glasses the vertical temperature gradients at the center of the molten mass and near the side wall in a experimental furnace were determined. From these data and the results obtained by Halle and Turner for the glasses containing varying amount of iron oxide a heat balance was drawn up and the heat k (cal/cm. sec. $^{\circ}\text{C}$) transmitted through the various glasses was calculated. The results representing the relation between calculated k and the iron content of glasses were plotted for the practical use. For example, the numerical value of k increased from 0.011 to 0.021% as the FeO rose from 0.30 to 0.15% for a constant Fe_2O_3 of 0.30%. The absorption coefficient of the glasses was also discussed.

緒 言

ガス加熱のガラスタンク窯の場合のように、ガラス層を上から加熱するときのガラス層内の熱伝達については、従来次のように説明されている。

1936 年に Preston¹⁾ は、タンク窯内におけるガラスの流れに関する研究から、ガラス層内では、主として対流伝熱によって熱が伝えられるとし、輻射による熱はガラスの表面層でほとんど吸収されてしまい、ガラスの底部までは到達しないと主張した。しかし、ガラス層内の各部の温度を、Plummer²⁾, Halle³⁾, Trier⁴⁾ などが実測し、無色ガラスに比べて色ガラスの方が窯の底の温度がはるかに低い結果を得ている。Kellett⁵⁾ はこの事柄を指摘して、これは対流伝熱だけでは説明できないとして、ガラス層の温度を輻射および伝導の伝熱から求めている。

この問題は、各種ガラスのタンク窯の深さの決定、窯内のガラスの流れの問題等と関連があり、最近 Czerny⁶⁾, Genzel⁷⁾ 等⁸⁾ によっても、理論的に詳細な研究が進められている。ただ、これらの研究では温度の計算式がかなり複雑である点など、実際問題に応用する場合に不便な点がある。そこで筆者らは実用的見地から、この問題に関する基礎的研究を行った。すなわち、各種の熱伝達係数をまとめて一つとして見かけの熱伝導率だけで代表し、また伝熱の方向はガラス表面から底への一方向のみについて取扱うこととした。

I. ガラスの見かけの熱伝導率の決定

Fig.1 に示すように横断面 $17.7 \times 10.8 \text{ cm}^2$ の実験炉にガラス約 2.2 kg (ガラスの厚さ 4.5 cm) を入れ上部から 3 本のブンゼンバーナーを使用し、都市ガス (ガス量は $1.4 \text{ Nm}^3/\text{hr}$) の焰でガラスを加熱し、炉がほぼ熱平衡の状態に達した後、ガラス中に図の A と

Fig.1 Vertical Section of Experimental Furnace having internal length of 17.7 cm

A' より Pt-Pt. Rh(13%) 熱電対 (直径 0.5 mm) を保護管に入れて挿入し、ガラスの各部の温度を測定した。ただし、なるべくガラスの対流が少ないような温度 ($900 \sim 1050^{\circ}\text{C}$) で実験を行った。炉が熱平衡の状態に達したか否かは、炉底の外壁 B と B' の温度を銅-コンスタンタンの熱電対によって測定して判定した。このような温度測定法は従来の研究者²⁾³⁾ のそれとはほぼ同じであるが、この方法では輻射の場で真の温度を得ることは難しいので⁶⁾、場所による温度の相対的な値に主として注目することとした。試料ガラスとしては青色塩ガラス (Fe_2O_3 0.6%), 無色の板ガラス (Fe_2O_3 0.1%) および炭素着色の褐色塩ガラス (Fe_2O_3 0.2%) を使用した。なお、都市ガスの組成の一例を示すと、 CO_2 2.6, CnHm 2.1, O_2 1.9, CO 15.8, CH_4 15.9, H_2 33.9, N_2 17.8%, 加熱室を出る排ガスは還元性で

あり、その組成の一例は CO_2 6.3, O_2 1.4, CO 6.0, N_2 86.3% である。

青色ガラスについての温度測定結果を Table 1 に示す。

表の数値から、(1) 炉の中心Aと中心より左側によった A' との部分では後者の部分のガラスの温度の方がやや低いこと、(2) ガス量を一定にした場合、2回の実験の数値はかなりよく一致している、(3) B と B' の温度はほぼ等しいことがわかる。

Table 1 Temperature Distribution in a Molten Mass of Green Glass

Run No. Depth(cm)	1		2	
	Left (°C)	Center (°C)	Left (°C)	Center (°C)
0.0	1030	1047	1028	1042
0.5	1014	1035	1012	1029
1.0	1002	1021	1003	1016
1.5	994	1014	996	1006
2.0	990	1004	991	1001
2.5	988	1000	986	996
3.0	983	992	982	990
3.5	979	989	976	986
4.0	975	982	971	982
4.5	971	978	966	979
Average temp. of glass (°C)	993	1006	991	999
Temp. of outer face of bottom block (°C)	148	149	145	149

次に Fig.2 に他のガラスについての測定結果を示す。いずれも炉の中央Aの位置における温度測定結果であり、比較のために青色ガラスの測定値も示し

Fig.2 Comparison between Temperature Gradients through Molten Masses of Glass

た。図の曲線から、無色および褐色ガラスではガラス表面に近い部分で温度勾配が大きいく、青色ガラスでは温度勾配が場所によって余り変化しないことがわかる。なお、炉の底の外壁温度は無色ガラスのときには 218°C 、褐色ガラスでは 190°C であった。

これらの実験で、ガラス層を通して下方へ流れる熱量に関しては、平板の伝熱の式が成立つものとするれば、

$$kF\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_B = \frac{\lambda \cdot \Delta\theta \cdot F'}{d'} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。ただし、 k はガラス層の見かけの熱伝導率 ($\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$)、 λ は底の炉材の熱伝導率 ($\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$)、 $\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_B$ はガラスの底での温度勾配 ($^\circ\text{C/cm}$)、 $\Delta\theta/d'$ は底の炉材内の平均の温度勾配 ($^\circ\text{C/cm}$)、 F , F' はそれぞれガラスの底面の面積 (cm^2) および炉底のブロックの平均断面積 (cm^2)、 d' は炉底のブロックの厚さ (cm) である。

上記の実験では、 $d'=6.5\text{ cm}$ 、 $F'/F=1.5$ であり、炉底の炉材としてはイソライト煉瓦 No.4 を使用したので、その熱伝導率 λ は $5.8 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$ (平均温度 570°C) とした。Table 1 と Fig.2 の値より $\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_B$ を求めれば、それぞれ Table 2 に示す値となる。これらの値を (1) 式に代入して見かけの熱伝導率 k を算出した結果を Table 2 に示す。

Table 2 Heat Transmitted through Glasses in the Molten State

Type of glass	Average temp. of glass (°C)	Temp. gradient at 4.5cm depth, $\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_B$ ($^\circ\text{C/cm}$)	Heat transmitted, k ($\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$)
Green	995	10	0.01
Colourless	933	2	0.05
Amber	943	2.7	0.04

このようにして求めたガラスの見かけの熱伝導率の値は、常温の熱伝導率 ($0.002 \sim 0.003 \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$) よりはるかに大きい値を示しているが、高温のガラスでは輻射伝熱が伝熱機構に大きな役割を演じているからである。

II. Halle らの実験結果より見かけの熱伝導率と吸収係数の算出

Halle ら³⁾ は第2報で、ガラス中の鉄分と温度との関係を究明し、ガラス層内の温度勾配を求めているが、温度勾配は炉の保温の程度によって左右されるので、実験炉で得た温度勾配の値をそのまま大型のタンク窯の場合に適用することはできない。(1) 式に示すような熱精算を行って、ガラス層の平均温度についての見

かけの熱伝導率のような値を求める必要がある。筆者らは Halle らの測定値から見かけの熱伝導率 k の値を上記と同じ計算方法によって算出してみた。計算に必要な数値と計算結果を Table 3 と Fig.3 に示す。Halle らの使用した基礎ガラスの組成は SiO_2 73.5, Al_2O_3 1.5, CaO 8.9, Na_2O 16.0, Fe_2O_3 0.07 であり, F'/F は 1.38 である。Fig.3 の曲線からわかるように, ガラス中の FeO の含量が増加すると k の値は小さくなり, とくに鉄分の含量の少ないときには鉄分の k におよぼす影響が大きい。

次にガラスの吸収係数については, Kellett⁵⁾ によればガラスの見かけの熱伝導率 $k(\text{cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C})$, 平均温度 $\theta_m(^\circ\text{K})$, 吸収係数 $\alpha(\text{cm}^{-1})$ の間には $k = \frac{86\theta_m^3}{\alpha}$ という関係が成立する。ただし $\sigma = 1.37 \times 10^{-12}$ である。

Fig.3 The Effect of Ferrous Oxide Content on the Heat k Transmitted through Glasses

Table 3 Relation between Calculated Heat k (cal/cm·sec· $^\circ\text{C}$) Transmitted through Glasses and Iron Oxide Content in Glasses

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fe ₂ O ₃ (%)	0.22	0.42	0.91	1.74	2.59	0.042	0.09	0.30	0.63	1.59	2.39	3.25
FeO(%)	0.07	0.094	0.137	0.193	0.217	0.033	0.061	0.153	0.217	0.38	0.47	0.50
$\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_B$ (°/cm)	8	14	24	28	34	8	12	18	30	36	40	46
$\Delta\theta/d'$ (°/cm)	102	98	94	93	87	98	98	96	89	87	81	78
$k \times 10^3$	48	27	15	13	9.8	47	31	21	12	9.2	7.8	6.5
Average temp. of glass (°C)	1305	1285	1255	1230	1190	1300	1280	1260	1230	1210	1160	1135
Melting condition	Oxidising						Neutral					

Run No.	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Fe ₂ O ₃ (%)	0.09	0.30	0.70	1.43	2.18	0.11	0.21	0.48	1.03
FeO(%)	0.15	0.30	0.45	0.64	0.78	0.23	0.34	0.53	0.826
$\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_B$ (°/cm)	11	30	36	42	45	24	34	40	44
$\Delta\theta/d'$ (°/cm)	93	87	84	77	74	86	84	79	75
$k \times 10^3$	32	11	8.9	6.9	6.2	13.8	9.4	7.3	6.5
Average temp. of glass (°C)	1205	1175	1157	1128	1100	1195	1153	1125	1096
Melting condition	Slightly reducing					Strongly reducing			

(Putting the temperatures measured by Halle and Turner in their laboratory tank, depth of glass 12.5 cm, thickness of bottom block 7.5 cm, thermal conductivity of bottom block 0.0025 cal/cm·sec· $^\circ\text{C}$, in the equation (1), the numerical values of k was obtained)

また, Genzel¹⁷⁾ らは, 吸収係数が熱線の波長によって変化しない場合には, 見かけの熱伝導率は

$$k = \frac{16\sigma n^2 \theta_m^3}{3\alpha}$$

で表わされることを発表している。

ただし, n はガラスの屈折率である。これらの関係式を利用して, これらの式に Table 3 の $k, \Delta\theta_m$ の値を代入し, $n=1.52$ として, 吸収係数 α の値を求めれば Table 4 の値を得る。

この表から, ガラスの吸収係数はガラス中の Fe_2O_3

の量よりも, FeO の量によって大きく影響されることがわかる。例えば Fe_2O_3 の含量が 0.4~0.7% である場合の No.2, 9, 15, 20 を比べれば FeO が 0.094, 0.217, 0.45, 0.53% と増加するにつれて, Kellett の式により求めた吸収係数 α は 1.46, 2.04, 3.58, 4.07 と増加しているが, FeO の含量が 0.3~0.5% のときについて Fe_2O_3 と α との関係は, No.19, 14, 15, 10, 11, 12 からわかるように, Fe_2O_3 が 0.21, 0.30, 0.70, 1.59, 2.39, 3.25% と大きく変

Table 4 Relation between the Absorption Coefficient α and Iron
Oxide Content in Molten Glasses

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fe ₂ O ₃ (%)	0.22	0.42	0.91	1.74	2.59	0.042	0.09	0.30	0.63	1.59	2.39
FeO(%)	0.07	0.094	0.137	0.193	0.217	0.033	0.061	0.153	0.217	0.38	0.47
α *	0.88	1.46	2.7	2.9	3.5	0.90	1.3	2.0	3.2	3.8	4.1
α **	0.59	0.97	1.8	2.0	2.3	0.6	0.88	1.4	2.1	2.5	2.7

Run No.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Fe ₂ O ₃ (%)	3.25	0.09	0.30	0.70	1.43	2.18	0.11	0.21	0.48	1.03
FeO(%)	0.50	0.15	0.30	0.45	0.64	0.78	0.23	0.34	0.53	0.826
α *	4.7	1.1	2.8	3.6	4.4	4.6	2.5	3.5	4.1	4.3
α **	3.2	0.73	1.8	2.4	2.9	3.1	3.8	2.3	2.7	2.9

* Obtained from Kellett's equation⁵⁾ $k = \frac{8 \sigma \theta_m^3}{\alpha}$

** Obtained from Genzel's equation⁷⁾ $k = \frac{16 \sigma n^2 \theta_m^3}{3 \alpha}$

化しても、吸収係数は 3.48, 2.76, 3.58, 3.77, 4.14, 4.74 であり、比較的に変動が小さい。

次に k と α の値について二、三の文献の値と比較してみよう。Genzel は輻射に関する理論式から、無色ガラス (板ガラス) では 900°C で $k=0.08$ cal/cm·sec·°C, 1200°C で $k=0.17$, 1300°C で $k=0.19$, 褐色ガラス (炭素-硫黄着色) では 950°C で $k=0.025$, 緑色ガラスでは 900°C で $k=0.02$ の値を得ており、また Kellett によれば、板ガラスは 1200°C で $k=0.117$, 0.8% の Fe₂O₃ を含むガラスでは 1200°C で $k=0.006$ である。これらの値と筆者らの算出した値とを比較すると着色ガラスでは両者の値は同程度であるが、無色ガラスでは筆者らの値の方がかなり小さいことが分る。この原因としては、実験結果に (1) 式を適用して k を求める計算法の精度が低いことがあげられるが、また一面、無色ガラスでは鉄分 (とくに FeO の百分率) のわずかな変化によって k の値は大きく変化するし、文献の無色ガラス中の FeO の量ははっきりしていないので、厳密な比較は困難であると思われる。

ガラスの吸収係数 α の値としては、Neuroth¹⁰⁾ により、褐色ガラスでは、波長 $\lambda=1.5\sim 2.5\mu$ で $\alpha=0.7\sim 0.8$ cm⁻¹, $\lambda=3.0\sim 4.0$ で $\alpha=5\sim 7$ であり、無色ガラス (板ガラス) については、 $\lambda=2.0\sim 2.7$ で $\alpha=0.15\sim 0.60$ (1300°C) の値が求められており、Merren¹¹⁾ によれば $\lambda=2.0$ で $\alpha=0.3$ (1200°C) であり、0.8% Fe₂O₃ を含む色ガラスでは $\lambda=2.0$ で $\alpha=6.0$ (1200°C) である。筆者らの算出した吸収係数の値もこれらの値の間に入っているが、吸収係数は熱線の波長とガラスの温度の函数であり、その絶対値を問題にする場合には波長と温度との関係を明記しなければならない。Table 4 の値は吸収係数の概略値を知ることおよび、ガラス中の鉄分との関係を知る点においては

有効であると思う。

III. k の値のタンク窯への適用

ガラス層の見かけの熱伝導率をガラスタンク窯へ適用する簡単な方法として次の方法をあげることができる。(1) 式と同じような考えから、タンクの敷瓦を通して下方へ流れる平均の熱量に関しては

$$\frac{k(\theta_1 - \theta_2)}{d} = \frac{\lambda(\theta_2 - \theta_3) \cdot F'}{F \cdot d'} = \frac{F''}{F} (\theta_3 - \theta_0)(h_c + h_r) \dots\dots\dots (2)$$

という関係が成立つと仮定する。ただし、 $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ はそれぞれ外気の温度、ガラス表面温度、ガラスの底の温度、敷瓦の外表面の温度 (°C), d はガラス層の厚さ (cm), F' は敷瓦の外表面積 (cm²), h_c, h_r はそれぞれ敷瓦の外表面における対流熱伝達係数および輻射熱伝達係数 (cal/cm²·sec·°C), 他の記号は (1) 式と同じである。

この式を使用して k と θ_2 との関係について検討してみよう。タンク窯の熔融部の表面積が $4 \times 8 = 32$ m², 敷瓦や種瓦の厚さが 30 cm である窯について、 $\theta_1 = 1420^\circ\text{C}$, $\lambda = 0.025$ cal/m²·sec·°C, $d = 100$ cm, $d' = 30$ cm, $F = 32$ m², $F' = 35.7$ m², $F'' = 39.6$ m², $\theta_3 = 30^\circ\text{C}$ とすれば、 $k=0.050$ のときには (2) 式より $\theta_2 = 1230^\circ\text{C}$, $\theta_3 = 215^\circ\text{C}$ を得る。ただし $\theta_3 = 215^\circ$ のときの h_c は 5.5, h_r は 10.2 である。次にガラスの熱伝導率 k がより小さい場合として $k=0.025$ について θ_2, θ_3 を算出してみると、 $\theta_2 = 1085^\circ\text{C}$, $\theta_3 = 192^\circ\text{C}$ となる。ただし $\theta_3 = 192^\circ$ のときの h_c は 5.4, h_r は 9.5 である。すなわち k の値が 0.050 から 0.025 に減少すると、ガラス層の底の温度は 1230°C から 1085°C にまで低下する。

実際には、ガラスタンク窯内各部のガラスの温度分

布はかなり複雑であるから⁴⁾ (2) 式のような簡単な式によって各部の底の温度を決定することは難しいが、このような取扱いによってガラスの熱伝達とガラスの底の平均温度やガラス層の厚さとの関係を比較検討することは可能であると思われる。

総 括

ガラス層内の温度と敷瓦外表面の温度測定値を使用し、ガラス層と敷瓦との部分の熱収支から、熔融ガラス層の熱伝達の特徴を表わす見かけの熱伝導率を求めこの値におよぼすガラスの色、ガラス中の鉄分の影響について検討した。

終りに、御指導を賜った沢井教授に厚く感謝の意を表します。

引 用 文 献

- 1) F.W. Preston, *Bull. Am. Ceram. Soc.*, **15**

- 409 (1936)
- 2) J.H. Plummer, *J. Am. Ceram. [Soc.]*, **26** 398 (1943)
- 3) R. Halle & W.E.S. Turner, *J. Soc. Glass Tech.*, **23** 171 (1939), **29** 5, 170 (1945), **30** 343 356 (1946) **31** 122 (1947)
- 4) W. Trier *Glastechn. Ber.*, **26** 5 (1953)
- 5) B.S. Kellett, *J. Opt. Soc. Am.*, **42** 339 (1952); *J. Soc. Glass Tech.*, **35** **36** 115 (1952)
- 6) M. Czerny & L. Genzel, *Glastechn. Ber.*, **25** 134, 387 (1952)
- 7) L. Genzel, *ibid.*, **26** 69 (1953)
- 8) A. Walther, *ibid.*, **26** 133 (1953)
- 9) I. Peyches, *Silicates Industriels*, **16** [4] 3 (1951)
- 10) N. Neuroth, *Glastechn. Ber.*, **25** 242 (1952), **26** 66 (1953)
- 11) W.J.R. Merren, *J. Soc. Glass Tech.*, **35** 230 (1951)

(4/19/54 受付)

好成绩の美濃焼共販

美濃焼業界では取引の正常化、価格の安定化をはかりメーカーの健全経営を確立するために製品の共販がようやく活発化してきた。スープレ皿について多治見タイル、土岐津、泉地内のセン茶、瑞浪の完成輸出が気をはいているが、近くは岐阜県タイル部会の白8分角共販、笠原茶碗共販があり注目されている。以下好成绩を収めている共販の実情をのぞいてみよう。

△多治見タイル工組 モザイクタイルの共販を行うために、独立の協組を設立したのが 28 年 8 月、発足当時は組合員の生産数量の 30% より行えなかったが着々と努力を重ねて、本年 4 月には 40% 6 月ごろからはついに 60% を組合で直販するに至った。伊藤理事長、熊沢専務以下幹部をはじめ一同の背水の陣をしいた健闘の賜で、他のモザイクタイル産地がテストケースとしてその成功を祝福し、一周年を経た今日、岐阜県タイル部会の全部が共販に乗出すきそい水となった。

29 年は多治見市内宮前町に 250 坪の雑下に 240 坪の共同作業場を設置する計画で、雑の下作業場は 9 月 18 日完成し、作業を開始する。絶対不渡なしを豪語しており、価格面でも協定価は断固として維持している。方針としては生産の 60% で、共販の線を引きあくまでも堅実運営を期している。複雑なモザイクタイル界にあって、この

成功は今後の活動をいよいよ期待させるものがある。

△瑞浪陶工組 スープレ皿の安値競争にどうをにやした岐工連が白のみはメーカーの大箱販売を宣言しているが、スープレ皿のみでなくすでに 6 年前から組合で完成事業を行って成功しているのに瑞浪がある。現在月間 1,000 ケースをさばいている。伊藤専務は「転写物やスープレ皿くらいは技術は不要で、メーカーでやらねばウソである。2,000 ケースまで組合で扱いたい」と語っているが、完成事業のみでなく釉薬工場で組合員の金使用量をまかない、両者を運搬するためトラック運輸も行っているので三者一体の妙を発揮、組合経費はこれで裕にまかなっており、近く土岐川沿い 600 坪の敷地に倉庫を建設する計画で売に行かなくても東京、大阪辺から引合にくるといわれるまで成功している。輸出完成の陶工組進出テストケースとして注目される。

△土岐津、泉、肥田陶工組 昨年 10 月 1 日から三陶工組が共同で実施に入った。取あげているのはセン茶碗である。毎年夏枯れ時には 3 個 10 円などといわれたものだが、多治見、土岐津、泉地区御商組の協力もあって共販はよい成績をあげ、今夏は共販最低値 1 個 3.8 円を維持した。秋からは需要期に入るのでさらにいく分の好転は必至で戦後最初の試みとして明るいこんごを予想させている。